



Fortbildung im Umweltsektor

Seminarband

Altlasten und Schadensfälle 2021

– Neue Entwicklungen –

Oberursel, 29. und 30. Juni 2021

Impressum

Herausgeber:

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie

Rheingaustraße 186

65203 Wiesbaden

Tel.: 0611-6939-0

Fax: 0611-6939-555

E-Mail: poststelle@hlnug.hessen.de

Bildnachweis Titelbild:

Denkmalamt Stadt Frankfurt am Main, Nr. 478

www.hlnug.de

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter.

In-situ Altlastensanierung im dicht bebauten innerörtlichen Bereich – Erkenntnisse und Empfehlungen

Dr. Volker Schrenk, CDM Smith Consult GmbH, Bickenbach
Oliver Trötschler, VEGAS – Universität Stuttgart
Michael Wolf, Regierungspräsidium Darmstadt, Wiesbaden
Bernd Strobehn, Jens Gessner, Magistrat der Stadt Oberursel

1 Standortbeschreibung und kurze Zusammenfassung des Falls

In Oberursel (Taunus) wurde in den 1950er Jahren bis Mitte der 1970er Jahre in der Altstadt ein chemischer Betrieb zur Destillation von Lösemitteln betrieben. Aus dieser Nutzung stammen Verunreinigungen des Bodens und des Grundwassers mit leichtflüchtigen halogenierten Kohlenwasserstoffen (LHKW). Schätzungen gingen von mehreren Tonnen LHKW im Untergrund aus.

Die Belastungen des Untergrunds haben dazu geführt, dass in den Gebäuden auf und um diese Fläche LHKW-Belastungen in der Raumluft oberhalb von entsprechenden Grenzwerten auftraten. Die Stadt Oberursel erwarb im Zuge der Altstadtsanierung in den 1980er Jahren das Grundstück und wurde damit als Zustandsstörer nach BBodSchG Sanierungspflichtiger, da die ursprünglichen Eigentümer des chemischen Betriebes nicht mehr greifbar waren.

Nach umfangreichen Vorerkundungen, sanierte die Stadt Oberursel von 2012 bis 2020 die rund 200 m² große Altlastenfläche. Aufgrund der Bebauung des Standortes mit denkmalgeschützten Fachwerkhäusern, der dichten, umgebenden Bebauung und der Tiefe des Schadensherdes entschied man sich – neben einer vorlaufenden Aushubsanierung des oberen Bodenmeters – für eine In-situ-Sanierung des Untergrundes mittels des Verfahrens der thermisch unterstützten Bodenluftabsaugung (Dampf-Luft-Injektion – DLI). Die DLI-Sanierung wurde von der Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung, VEGAS (Universität Stuttgart) in 2012 geplant und im Rahmen einer Pilotsanierung am Standort getestet. Nach dem erfolgreichen Sanierungsverlauf der Pilotanwendung wurde der gesamte Standort damit saniert.

Die geplante Sanierung und die ersten Sanierungsphasen wurden in der Öffentlichkeit kritisch betrachtet und kontrovers diskutiert. Es gab Bedenken, dass es zu einer Gefährdung der Anwohnenden durch die verdampfenden Schadstoffe kommen könnte und dass das Grundwasser stark belastet werden würde. Die Kritiker des Sanierungsverfahrens favorisierten stattdessen eine Aushubsanierung mit einem Rückbau der denkmalgeschützten Gebäude und anschließendem Wiederaufbau. Das Fernsehen, wie auch mehrere Zeitungen, berichteten intensiv über die Sanierung und insbesondere auch über die Kritik und Bedenken am Verfahren.

Aufgrund der in der Öffentlichkeit angespannten Situation stoppte die Stadt Oberursel die Dampf-Luft-Injektion der DLI-Sanierung im Frühsommer 2014 - die Bodenluftabsaugung und Grundwasserförderung wurde weiterbetrieben - und schrieb eine Projektsteuerung für das Vorhaben aus, die die CDM Smith Consult GmbH im Sommer 2014 übernahm. CDM Smith hat mit seinem Einstieg in das Projekt die auf dem Standort befindliche Sanierungsanlage und das Sanierungsfeld überprüft und basierend auf den Ergebnissen eine Reihe von Optimierungen geplant und umgesetzt. Hierzu fanden umfangreiche Bohr- und Umbauarbeiten statt. Ziel der Bohrarbeiten war es, den Untergrund der Sanierungsfläche für das Verfahren der Bodenluftabsaugung mit Dampf-Luft-Injektion in den zu sanierenden Grundstücksabschnitten besser zu erschließen. Insgesamt wurde auch das Gesamt-

erscheinungsbild der Sanierungsfläche ausgehend von der Piloteinrichtung deutlich verbessert. Im Hinblick auf eine bessere Standortsicherung wurden in allen Förderbrunnen Grundwasserpumpen installiert, um ein Abströmen von kontaminiertem Grundwasser vom Standort zu unterbinden. Parallel zu den Umbauarbeiten an der Sanierungsanlage wurde ein umfangreiches Standortüberwachungsprogramm, u. a. mit Raum- und Außenluftmessungen, etabliert.

In Zusammenarbeit mit der Stadt Oberursel und dem Regierungspräsidium Darmstadt wurde eine intensive Öffentlichkeitsarbeit etabliert, um den existierenden massiven Bedenken hinsichtlich der Sanierungstechnik in Teilen der Bevölkerung entgegenzuwirken. Dabei kam es darauf an, die Informationen auf den Empfänger (u. a. direkt betroffene Anwohnende, BürgerInnen von Oberursel, politische Gremien) zuzuschneiden. Im Verlauf des Projektes gelang es dadurch wieder Vertrauen und Glaubwürdigkeit zurück zu gewinnen und die Diskussionen zu versachlichen.

Nach der Anlagenüberprüfung im Sommer 2014, den anschließenden Umbau- und Bohrarbeiten wurde die Dampf-Luft-Injektion der DLI-Sanierung im Frühsommer 2015 wieder angefahren. Insgesamt wurden im Zuge der DLI-Sanierung rund 4 Tonnen LHKW aus dem Untergrund entfernt. Im Laufe der Sanierung wurde der Betrieb der Sanierungsanlage laufend optimiert.

Ab 2018 gingen trotz hoher Temperaturen im Untergrund die LHKW-Austragskonzentrationen signifikant zurück, so dass die Dampf-Luft-Injektion im Sommer 2019 eingestellt und mit der Nachsorgephase begonnen wurde. In der Nachsorgephase wurde die Bodenluftabsaugung weiter betrieben, während der Boden langsam abkühlte.

Im Sommer 2020 wurde zusätzlich auf der Sanierungsfläche eine Sanierung des Grundwasserkörpers mit dem Verfahren der In-situ-Chemischen-Oxidation (ISCO) durchgeführt, um eine Rekontamination der ungesättigten Bodenzone aufgrund der hohen Belastung des Grundwassers zu vermeiden.

Im Herbst 2020 wurde in der Bodenluft der vom Regierungspräsidium Darmstadt vorgegebene Sanierungszielwert von 25 mg/m³ an nahezu allen Bodenluftabsaugbrunnen und insbesondere im Gesamtstrom unterschritten und das Sanierungsziel für die ungesättigte Bodenzone damit erreicht.

In der Nachsorgephase der Sanierung erfolgt mindestens bis 2022 eine Überwachung von Grundwasser, Bodenluft und Raumluft.

2 Sichtweise der Genehmigungsbehörde

Auf dem betroffenen Grundstück wurden von 1954 bis ca. 1976 durch die Fa. Dr. Büscher und Gausmann Korrosionsschutzmittel hergestellt, LHKW gelagert, sowie Destillierapparate zur Aufbereitung von Tri- und Tetrachlorethen (TCE, PCE) und eine Fassreinigung mit Lösemitteln betrieben. Umwelttechnische Untersuchungen der Stadt ergaben Bodenluftbelastungen bis zu 4.200 mg/m³ LHKW und Grundwasserbelastungen bis zu 680.000 µg/l LHKW. Damit war der in der Verwaltungspraxis des Regierungspräsidiums (RP) verwandte Geringfügigkeitsschwellenwert von 20 µg/l LHKW, bei dem zu prüfen ist, ob eine schädliche Grundwasserverunreinigung vorliegt, deutlich überschritten. Raumluftuntersuchungen im unmittelbar betroffenen Wohnhaus ergaben darüber hinaus Überschreitungen der 2. BImSchV für Tetrachlorethen im Wohn-/Arbeitszimmer und im Keller.

Handlungsstörer für die LHKW-Kontamination war die Fa. Büscher und Gausmann aufgrund der Herstellung von Korrosionsschutzmittel und Aufbereitung von LHKW. Recherchen ergaben die Löschung der OHG zum 18.09.1975. Auch wurde kein Rechtsnachfolger gefunden. Daher kam als Sanierungsverantwortliche nur die Stadt Oberursel als Eigentümer des Grundstückes in Frage.

Durch die Stadt erfolgten vertiefende Untersuchungen und Machbarkeitsstudien. Wegen der LHKW-Verunreinigungen bis ca. 14 m unter GOK wurde vereinbart, ein Sanierungskonzept mit einer Dampf-

Luft-Injektion (DLI) und vorlaufender oberflächennaher Aushubsanierung zu erarbeiten. Damit wollte man auch der denkmalgeschützten Bebauung und den engen Platzverhältnissen gerecht werden.

Mit Bescheid des RP Darmstadt vom 14.02.2012 wurde der Sanierung des Grundstücks mit DLI zugestimmt. Als Sanierungsziele wurden u. a. festgelegt: $< 25 \text{ mg/m}^3$ LHKW bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$ in der Bodenluft, $< 10 \text{ } \mu\text{g/l}$ LHKW im Grundwasser.

Am 19.10.2017 wurde vom RP ein Abschaltkriterium für die DLI von 135 mg/m^3 LHKW bei $60 \text{ }^\circ\text{C}$ festgelegt, da es mehrere Monate dauern kann, bis der Boden wieder Normaltemperatur erreicht. Dies entspricht nach einem eigens hierfür entwickelten Algorithmus dem Sanierungszielwert von 25 mg/m^3 bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Nachdem im Sommer 2019 die Schadstoffkonzentrationen in fast allen Absaugbrunnen unter dieses Abschaltkriterium gefallen waren, wurde mit Zustimmung des RP die DLI zum 31.07.2019 abgeschaltet.

Regelmäßige Raumlufmessungen wurden in mehreren Gebäuden der Umgebung durchgeführt und monatlich gutachterlich bewertet. Der für den Standort festgelegte Eingreifwert von $100 \text{ } \mu\text{g}$ Summe LHKW/ m^3 und der vom Ausschuss für Innenraumrichtwerte (AIR) ausgewiesene „risikobezogene Leitwert“ von $20 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ für Trichlorethen wurde im Verlauf der Sanierung nicht überschritten.

Es wurden etwa 60 Baubesprechungen durchgeführt, an dem neben dem RP Darmstadt die Stadt Oberursel, das Ingenieurbüro CDM Smith Consult GmbH, VEGAS und das Gesundheitsamt teilnahmen. Hierdurch konnte recht schnell auf veränderte Bedingungen und Schwierigkeiten im Verlauf der Sanierung reagiert und entschieden werden.

Am 19.11.2020 wurde die Beendigung der Sanierung beantragt, da das Sanierungsziel aus gutachterlicher Sicht erreicht sei.

Die im Verlaufe der Sanierung extrahierte Menge von ca. 3-4 to zeigt, dass die durchgeführten Maßnahmen im Hinblick auf die Anforderungen des Wasser- und Bodenschutzrechts dringend erforderlich waren. Mit den angewandten und variierenden Sanierungsmethoden und Anpassungen der Anlagentechnik wurden mehrere Ansätze unternommen, eine umfassende Dekontamination des verunreinigten Grundstücks zu erreichen. Somit waren die angewandten Verfahren geeignet, dem Sanierungsziel so nahe wie möglich zu kommen. Weitere Maßnahmen waren demzufolge nicht angemessen. Im Ergebnis wurde die DLI-Sanierung des Grundstücks Eppsteiner Str. 13 mit Bescheid vom 22.12.2020 abgeschlossen. Wegen der noch erhöhten LHKW-Gehalte unterhalb des unmittelbar betroffenen Wohnhauses an der Eppsteiner Straße wird als Sicherungsmaßnahme und aus Vorsorgegründen weiterhin abgesaugt. Dies erfolgt so lange, bis das Sanierungsziel von $< 25 \text{ mg/m}^3$ LHKW erreicht ist, oder der Nachweis erbracht wird, dass über den Wirkungspfad Boden-Mensch keine Gefährdung zu erwarten ist.

Das Sanierungsgrundstück in Oberursel besteht aus zwei Flurstücksteilen. Das vordere Flurstück wird nun im Altflächeninformationssystem ALTIS mit dem Status „Altlast – In der Sanierung (Sicherung)“ wegen der noch laufenden Sicherungsmaßnahmen geführt. Das hintere Grundstück erhielt wegen der abgeschlossenen Sicherungsmaßnahmen den Status „Sanierung (Dekontamination) abgeschlossen“. Diese Vermerke dienen dem Zweck, die durchgeführten Maßnahmen und den gegenwärtigen Zustand der Grundstücke dauerhaft zu dokumentieren.

3 Eingesetzte Sanierungstechnik

3.1 DLI-Sanierung

Die Versuchseinrichtung für Grundwasser- und Altlastensanierung (VEGAS) des Instituts für Wasser- und Umweltsystemmodellierung der Universität Stuttgart konzipierte, erstellte und betrieb zwischen Juli 2012 – Dezember 2020 eine thermische In-situ Sanierung mittels Dampf-Luft-Injektion (DLI-Sanierung) in Oberursel. Die Sanierung wurde gutachterlich zunächst von der Dr. Hug Geoconsult GmbH, Oberursel und ab 2014 durch das Büro CDM Smith Consult GmbH, Bickenbach betreut.

In der Pilotphase (16.01.2013 – 30.09.2013) wurde mit finanzieller Unterstützung des Helmholtz Zentrums für Umweltforschung - UFZ, Leipzig die Anwendbarkeit des Verfahrens auf einer bebauten Fläche und bei schlecht durchlässigem tonigem Untergrund überprüft. Besonderes Augenmerk lag auf möglichen Setzungen, der erreichbaren Wärmeausbreitung und der vollständigen Erfassung der verdampften Schadstoffe über die „heiße“ Bodenluftabsaugung.

In Folge der positiven Ergebnisse der Pilotanwendung in allen Fragestellungen konnte eine Sanierung des gesamten Standorts mittels DLI empfohlen werden. Maßgebliche Setzungen bzw. Hebungen (3 – 6 mm) konnten nicht nachgewiesen werden, die umfassende Schadstofffassung (Reichweite der Bodenluftabsaugung) wurde mittels Gastracertests bestätigt und eine langsame Wärmeausbreitung im Bereich von Monaten für die schlecht durchlässigen tonigen Kiese an Stelle von Wochen für gut durchlässige, sandige Böden wurde verifiziert. Die hydraulische Durchlässigkeit der behandelten Kubatur zwischen 2 – 12 m u. GOK liegt bei 6×10^{-6} m/s.

Aufgrund der räumlichen Enge und die mit einem Wechsel des Betreibers zu einer Sanierungsfirma erforderlichen unangemessenen Umbaumaßnahmen wurde die DLI im Auftrag des Magistrats der Stadt Oberursel nach Ende der Pilotphase bis Sommer 2019 durch VEGAS weiter betrieben.

Im Juli 2019 wurde die DLI beendet. Während der Abkühlphase mit dem Betrieb der Grundwasserförderung und Bodenluftabsaugung bis zum Abbau der Sanierungstechnik Anfang Dezember 2020, kühlte sich der Bodenkörper von ca. 82 °C mittlere Temperatur auf ca. 24 °C ab und an 19 von 21 Absaugbrunnen lagen die LHKW-Gehalte unter 25 mg/m³.

3.1.1 Sanierungstechnik und Sanierungsverlauf der DLI am Standort

Die thermische In-situ-Sanierung basiert auf der Injektion eines Wasserdampf-Luft-Gemisches in die Sickerwasserzone unterhalb bzw. auf Höhe des Schadenszentrums. Eine simultane Injektion in den Grundwasser- und Schichtwasserbereich (teilgesättigte Zone bzw. ungesättigte Zone) erfolgte standortbedingt, s. Abbildung 1.

Die Schadstoffe werden infolge der sich um die Injektionsbrunnen (z. B. I8, I5, s. Abb. 1) ausbreitenden Dampf- bzw. Wärmefronten fortlaufend verdampft. Die dem Dampfstrom beigemengte Luft trägt die im Boden verdampften Kontaminanten gasförmig in Richtung der Absaugbrunnen in der ungesättigten Bodenzone. In Folge der Auftriebskräfte werden simultan die (teil)gesättigte und ungesättigte Zone behandelt. Die Entfernung der Schadstoffe erfolgt über die „heiße“ Bodenluftabsaugung (z. B. Extraktionsbrunnen E8, E9, E3, etc., s. Abb. 1)

Mit Erwärmung der gesättigten Zone bzw. der Schichtwasserzone erhöht sich die Löslichkeit der Schadstoffe im Grundwasser. Der Betrieb einer hydraulisch wirksamen Grundwassersicherung war am Standort aufgrund der Durchlässigkeiten, der geringen Mächtigkeit und der hohen Temperaturen nur mittels einer Vielzahl von kleinskaligen, druckluftbetriebenen speziell entwickelten „Sickerwasserpumpen“ möglich. Während der Pilotanwendung wurden 5 Brunnenpumpen für das Feld 1 und 2 betrieben. Nach der Optimierung der Maßnahme im Frühjahr 2015 wurde insgesamt an 17 Brunnenpumpen abgesaugt.

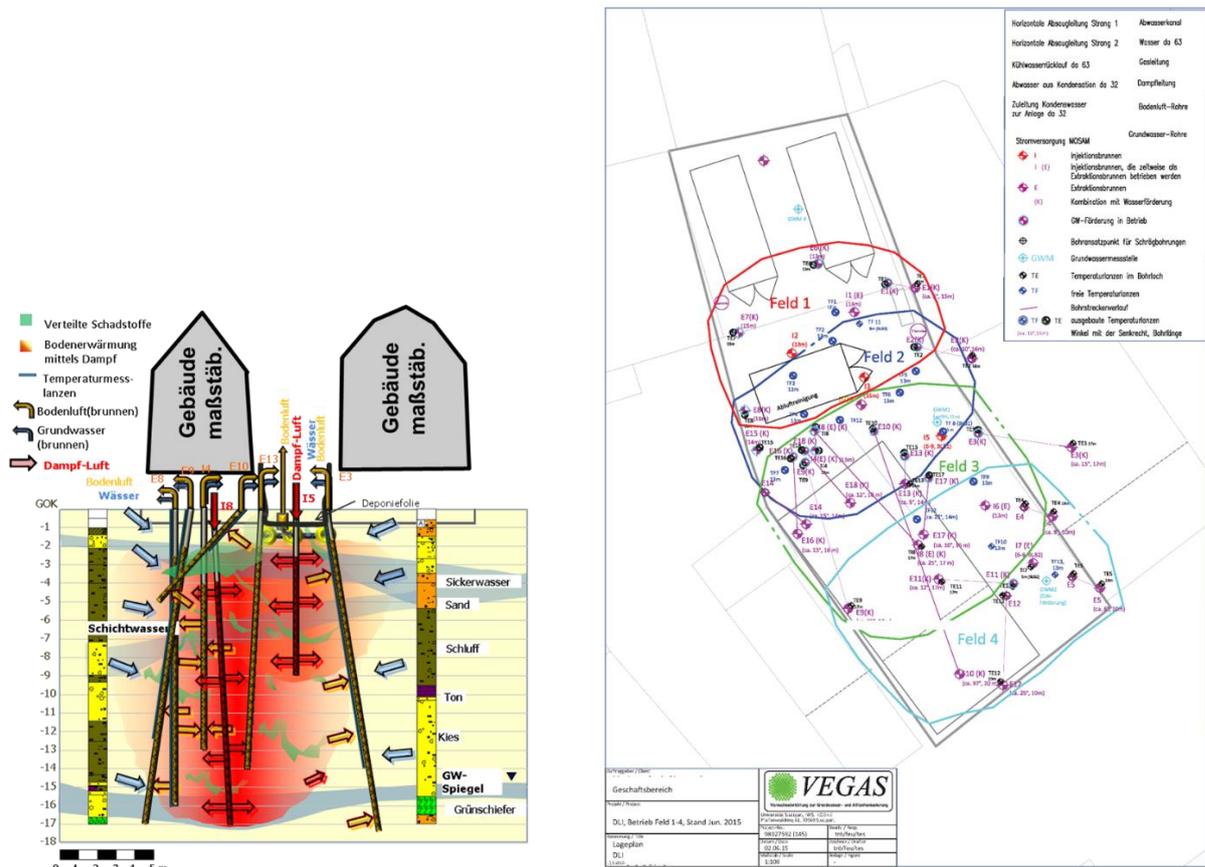


Abb. 1: links: Querschnitt der DLI am Standort, rechts: Erschließung Sanierungsfeld

Durch die Injektion einer Dampf-Luft-Mischung beginnen die Schadstoffe bereits bei Temperaturen unterhalb der Dampfperatur des Wassers von 100 °C, der Gemisch-Siedetemperatur, zu siedern und können gaseitig ausgetragen werden. Im Falle des am Standort anzutreffenden TCE-PCE-Gemischs liegt die Gemisch-Siedetemperatur bei 78 °C.

Hinsichtlich der Bohrtechnik stellte die enge Bebauung des Standorts bautechnische Probleme. Von den 20 abgeteuften Brunnen mussten 15 Brunnen zur Erfassung des überbauten Geländes als Schrägbohrung ausgeführt werden. Die Sicker- und Grundwasserförderung erfolgte in den Absaugbrunnen. Diese waren als Kombibrunnen in 4“ ausgebaut. Generell wurde der Untergrund bis zum Antreffen der Felszersatzzone und dem anstehenden Grünschiefer erbohrt.

Die Sanierungstechnik basiert auf der mobilen Pilotanlage MOSAM [1] und beinhaltet die Komponenten der Dampf-Luft-Erzeugung, der Bodenluftabsaugung mit Kühlung sowie der pneumatisch betriebenen Kondensat-, Sickerwasser- und Grundwasserförderung. Im Verfahrensfließbild, Abb. 2, sind die Komponenten mit den maßgeblichen Leistungsdaten dargestellt.

Im Wesentlichen wurde die DLI mit einer Dampf-Luft-Menge bzw. einer Injektionsleistung von 60 – 100 kW, einer Absaugleistung von 120 – 180 Nm³/h und einer Wasserförderung mit 2 – 4 m³/d betrieben. Die erforderliche Kühlleistung der Bodenluftkühlung lag um 50 kW.

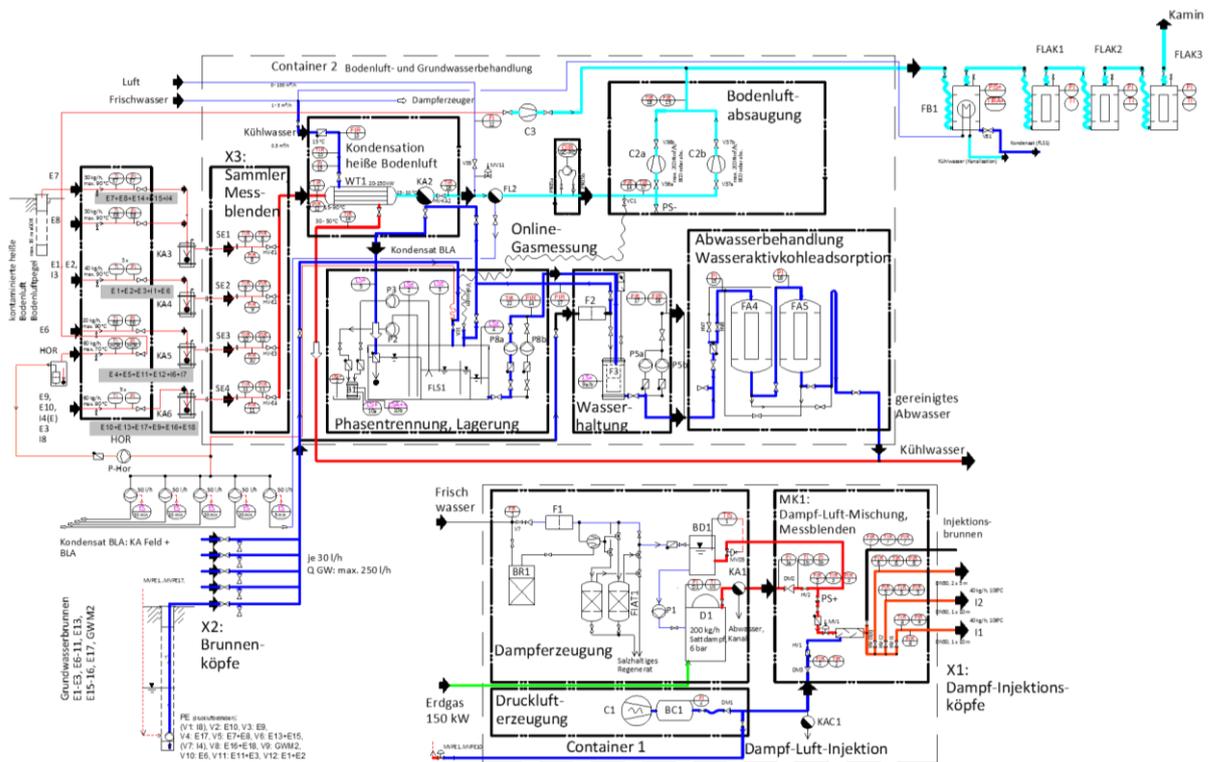


Abb. 2: Verfahrensfließbild DLI Eppsteiner Straße

Es wurde von Norden nach Süden hin in der Reihenfolge Feld 1 (Pilotanwendung), Feld 1-2, Feld 1-2-3, Feld (1)-2-3, Feld 2-3-4, s. Abb. 1 saniert. Die Dampf-Luft Zugabe erfolgte entsprechend den Abschnitten in 2 - 5 Injektionsbrunnen der insgesamt errichteten 8 Brunnen I1 – I8 (2“ Ausbau) zwischen 3 - 13 m u. GOK mit maximal 0,5 bar Überdruck. Die Bodenluft wurde während der Pilotphase an 8 Absaugbrunnen (Ausbau in 2“ bzw. 4“) im Bereich von 2 - 14 m u. GOK sowie 3 Injektionsbrunnen sowie einer flächig verlegten Absaugungsdrainageleitung in 60 cm Tiefe abgesaugt. Nach der Optimierung erfolgte die Absaugung an 18 Brunnen sowie der Bodenluftdrainage. Der Wasserstand des gespannten Aquifers schwankte zwischen 13 - 9,0 m u. GOK.

Die heiße Bodenluft, mit Temperaturen zwischen 40 - 85 °C wurde im Plattenwärmetauscher auf ca. 25 °C abgekühlt und die Schadstoffkonzentration mittels einem Prozessgaschromatographen in der kondensierten Bodenluft, nach dem zweiten Luftaktivkohlefilter sowie in der Abluft stündlich bestimmt. Ab 2016 wurde zudem die Bodenluft der einzelnen Absaugstränge analysiert, um das Absaugregime besser optimieren zu können.

Die Reinigung der Abluft erfolgte mittels Luftaktivkohle. Ab 2016 wurde eine dreistufige Adsorptionseinheit mit je 200 kg Luftaktivkohle eingesetzt. Während der Pilotanwendung waren es jeweils 100 kg Aktivkohle. Eine in 2015 betriebene automatisch arbeitende Adsorptions-/Desorptionseinheit stieß aufgrund der hohen LHKW-Gehalte und der Luftfeuchte an seine technischen Grenzen und wurde mit der Aktivkohleabsorptionsanlage ersetzt. Die gereinigte Abluft wurde nach BImSchV über einen Kamin auf 2 m über Dach des höchsten Gebäudes im Umkreis von 50 m emittiert. Die Abluftwerte von 20 µg/m³ LHKW wurden mit Einsatz der Aktivkohle nie überschritten.

Zur Kontrolle der Temperaturen im Sanierungsfeld waren alle Kombibrunnen mit Temperaturfühlern (Temperaturmesslanzen TML, Pt100) in Tiefen von 1-3-5-7-9-11-13 m u. GOK bestückt. Zudem waren in 13 Bohrungen im Feld TML im Untergrund eingebaut. Insgesamt konnte die Wärmeausbreitung mit 217 Temperaturfühlern dargestellt werden.

Nachfolgend werden die Betriebsdaten des Schadstoffaustrags, der Dampf-Luft-Injektion sowie der Bodenluftabsaugung über den Betriebszeitraum von Januar 2013 – Dezember 2020 dargestellt.

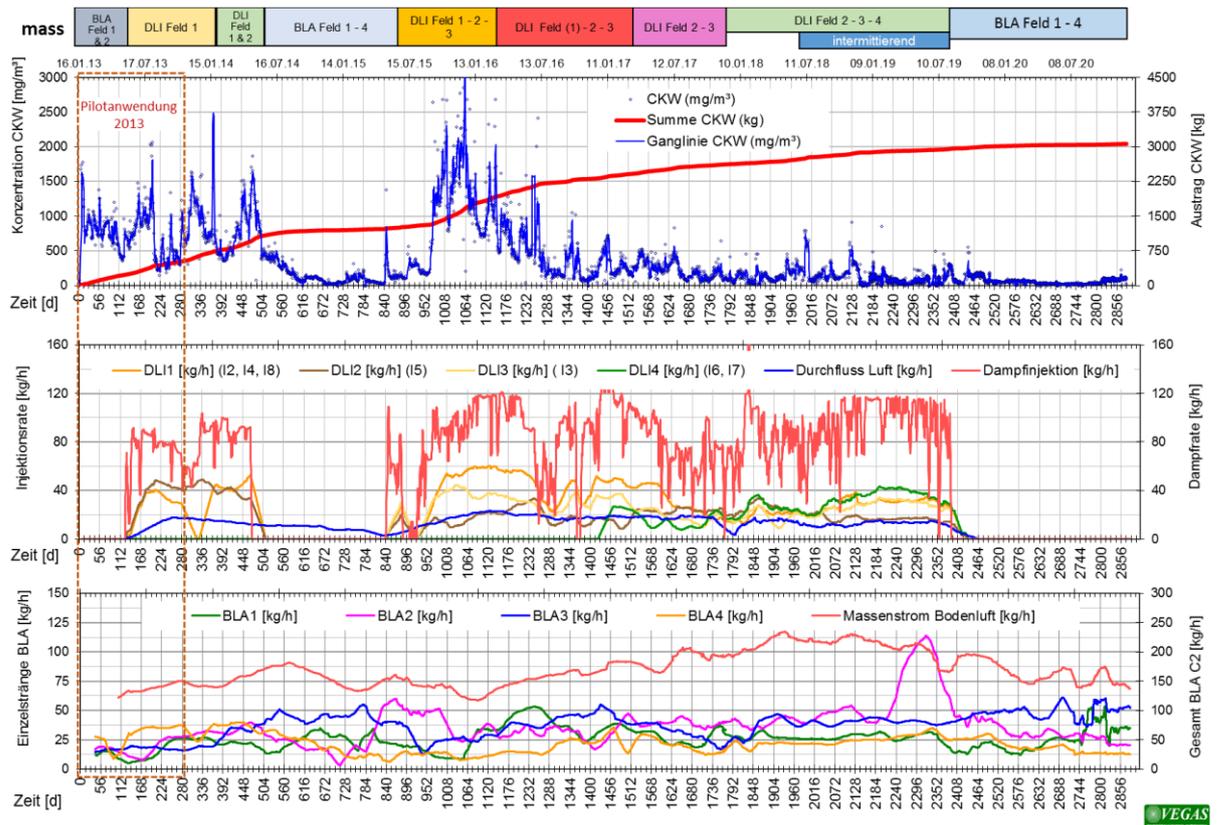


Abb. 3: Sanierungsprozess

Bereits zu Beginn der Pilotanwendung mit vorgeschalteter Bodenluftabsaugung konnten ca. 250 kg LHKW aus der gesamten Sanierungsfläche entfernt werden (oberes Diagramm, Abb. 3). Zum Ende der Pilotanwendung waren es 750 kg LHKW. Die fortlaufende DLI in Feld 1 steigerte den Austrag mit fortschreitender Wärmefront. Nach Zuschaltung von Feld 2 konnten bis zur Sanierungspause im Mai 2014 ca. 1.250 kg LHKW aus ca. 100 m² Schadensfläche entfernt werden. Während dieser Betriebsphase lagen die LHKW-Gehalte in der Bodenluft zwischen 1.000 – 2.000 mg/m³.

Die am höchsten kontaminierten Bereiche, Feld 2 und Feld 3, wurden effektiv ab August 2015 mit Dampf-Luft beschickt (mittleres Diagramm, Abb. 3). Über die betriebenen 5 Injektionsbrunnen wurden ca. 100 kW Wärme in den Boden eingetragen. Mit einer Absaugrate von 150 Nm³/h (unteres Diagramm, Abb. 3) und Konzentrationen um 2.000 mg/m³ betrug der LHKW-Austrag ca. 7 kg/d aus ca. 120 m² behandelter Fläche mit einer Mächtigkeit von 10 m. Zum Jahresende 2016, dem ursprünglich geplanten Abschluss der DLI am Standort, war der Abschnitt 4 noch nicht erwärmt. Die Brunnen unterhalb des Gebäudes und am westlichen Rand der Sanierungsfläche (E8, E18, E10, E12) zeigten noch LHKW-Werte im g/m³ Bereich. Zu diesem Zeitpunkt waren bereits 2.500 kg LHKW entfernt worden.

Bereits im Frühjahr 2016 war der Untergrund weitreichend auf über 82 °C erwärmt und die Dampfmenge wurde entsprechend reduziert. Es wurden im Mittel 50 KW Wärme eingetragen. Die flächige Darstellung der Bodentemperaturen unterhalb der am stärksten kontaminierten Sickerwasserzone (3 – 8 m u. GOK) zeigt den abschnittswisen Fortschritt der Sanierung.

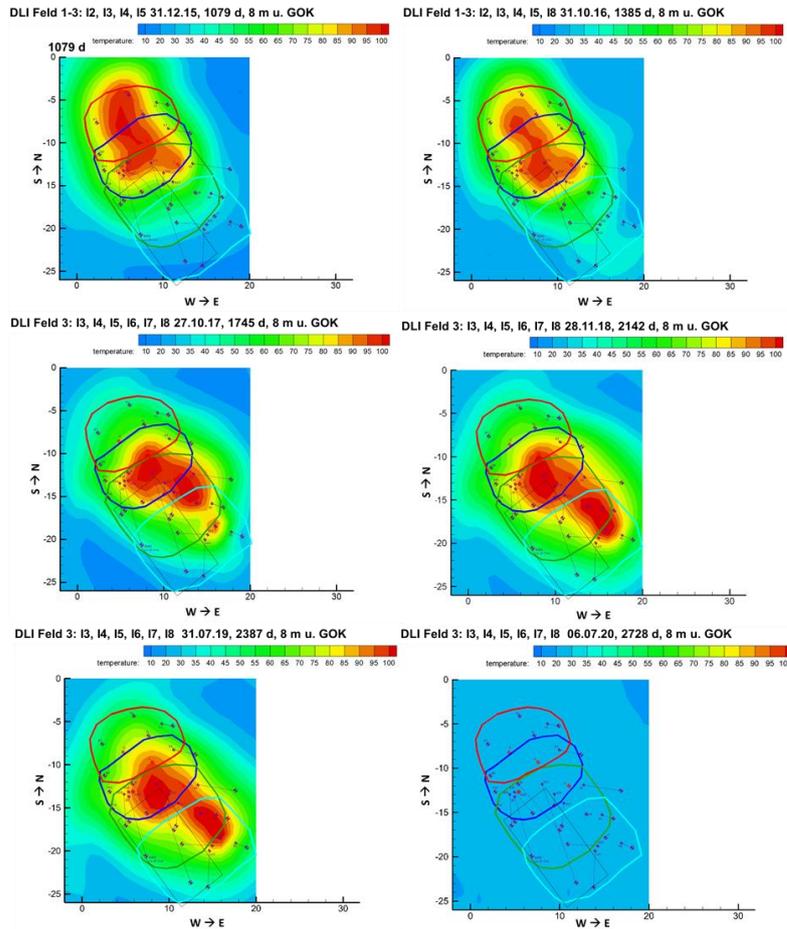


Abb. 4: Temperatursausbreitung während der Sanierung auf 8 m u. GOK

Die Austragsleistung ging im weiteren Verlauf auf Werte unter 1 kg LHKW täglich zurück. Nun wurden gezielt Feld 2 und 3 mit einer erhöhten Wärmemenge erschlossen, was zu einem viermonatigen Anstieg des Austrags auf ca. 2 kg/d LHKW führte. Die Sanierung der ehemals am höchsten kontaminierten Feldabschnitte 2 und 3 reichte bis in den Herbst 2017 und wurde danach um das Feld 4 erweitert. Eine deutliche Austragssteigerung konnte (die Austragsraten lagen unter 500 g/d LHKW) mit dem intervallweisen Betrieb der DLI über einen Zeitraum von 4 Monaten erzielt werden.

Durch diese Fahrweise sollte sowohl die Temperatur konstant gehalten werden, die Dampfmenge reduziert und gleichzeitig der Effekt der Ausbildung eines hohen Unterdrucks durch die Kondensation des Dampfes im Boden genutzt werden. In Folge des hohen Unterdrucks in den Bodenporen wird ein Ansaugen von Restkontamination aus den Porenwickeln erzeugt. Zum Abschluss der DLI lag der Schadstoffaustrag bei ca. 60 g/d LHKW.

Nach Abschluss der DLI sanken (temperaturbedingt) die Gehalte an allen Brunnen, mit Ausnahme des im südlichen Bereich unter dem Wohngebäude liegenden Absaugbrunnen E11, unter den Sanierungszielwert. Aufgrund dieser Entwicklung ist zu vermuten, dass im südwestlichen Bereich ein Schadensherd liegt, der erst durch die konduktive Erwärmung erschlossen wurde und nachdem die Dampfströmung abgeschlossen wurde, der pneumatische Anschluss von E11 einen Anstieg der Gehalte bis in den g/m³ LHKW-Bereich verursacht. Begründet wird dieser Verdacht, dass ein unterstromig gelegener Grundwassersicherungsbrunnen nahezu unverändert hohe LHKW-Gehalte zeigt.

Die flächige Darstellung der LHKW-Gehalte in der Bodenluft stellt die Entwicklung zu Beginn der Wiederaufnahme der DLI im Sommer 2015, die Restkontamination am westlichen Rand des Sanierungsgebiets sowie in Feld 4 Ende 2017, zum Abschluss der Dampf-Luft-Injektion im Sommer 2019 sowie dem Sanierungsabschluss im Dezember 2020 dar.

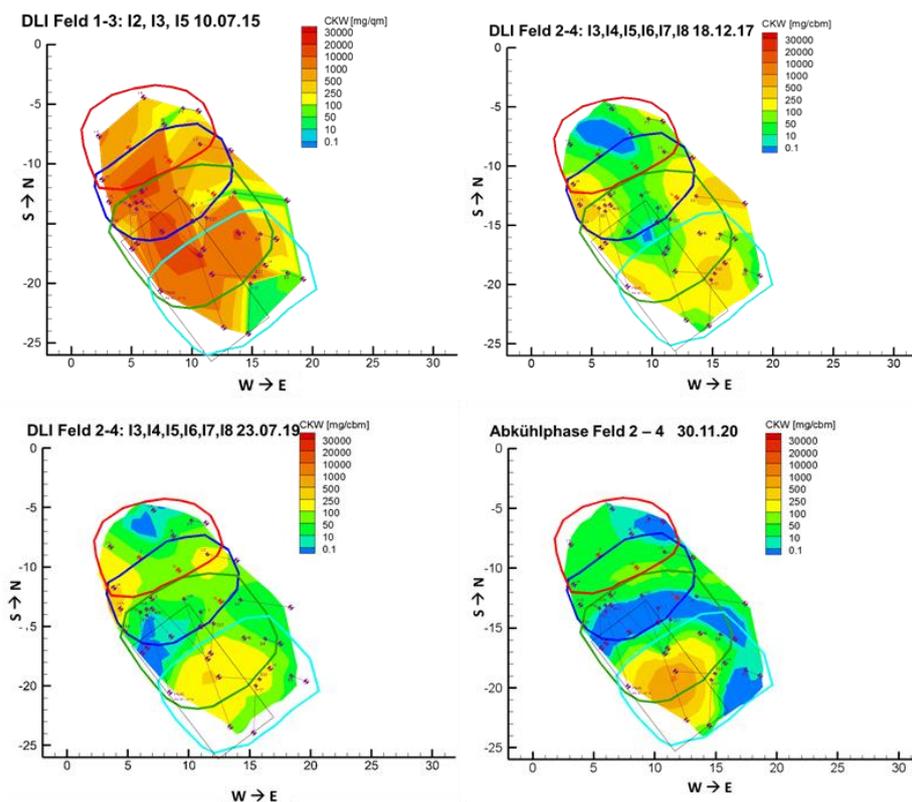


Abb. 5: Entwicklung der LHKW-Gehalte in der Bodenluft

Es wurden 2.830 MWh Wärmeenergie in den Untergrund eingeleitet. Davon wurden 1.750 MWh, also rund 45 % über die Bodenluftabsaugung und die Förderung des heißen Grundwassers entzogen.

3.1.2 DLI am Standort und die Verfahrensgrenzen

Aufbauend auf der Pilotanwendung begann im Februar 2014 ein Betrieb der DLI über 30 Monate, um 4.000 kg LHKW am Standort zu entfernen. Wird der Stopp der DLI (Mai 2014 – Juli 2015) eingerechnet, wurde eine Laufzeit der DLI bis Dezember 2016 projiziert. Nach dem Betriebsstopp konnten die täglichen Austragsraten der Pilotanwendung bzw. der Behandlung von Feld 1 & 2 von ca. 4 kg/d LHKW nur zu Beginn der Behandlung von Feld 2-3 wieder realisiert werden, in den letzten beiden Betriebsjahren gingen die Austragsraten auf unter 1 kg/d LHKW zurück.

Als Ursache kann neben der Unterbrechung mit Abkühlung und Kondensation der gasförmigen Schadstoffe in den Zwickelbereichen des feinporigen, tonigen Bodens im Wesentlichen die Adsorption der LHKW auf dem organischen Bodenmaterial angeführt werden.

Im Rahmen einer Masterarbeit in VEGAS [2] konnte eine Erhöhung der Desorptionsdauer um einen Faktor 2 bei 1 – 1,5 % Anteil organischer Masse im Bodenmaterial bestimmt werden. Das durch VEGAS bereitgestellte Tool zur Dimensionierung einer DLI (DLI-Tool 2.0, <https://www.iws.uni-stuttgart.de/vegas/downloads>) berücksichtigt die Verschlechterung der Desorptionsleistung bei thermischen In-situ-Verfahren in Abhängigkeit des organischen Anteils des Bodens.

Im Verlauf des 8-jährigen Betriebs der Anlage wurden 6.716 m³ Grundwasser gefördert. Mit einer mittleren Konzentration von 30 mg/l LHKW ergibt sich eine wasserseitig ausgetragene Masse von 336 kg LHKW. Dies ist ca. 11 % der durch die Bodenluft entfernten Menge und bedeutet, dass theoretisch 71 Jahre Grundwasser gefördert werden muss, um dieselbe Menge Schadstoff zu entfernen wie die DLI. Die pneumatische Wasserförderung ist energieintensiv. Zur Förderung der durchschnittlichen Menge von 155 L/h werden ca. 1,5 kW Leistung benötigt. Umgelegt auf eine Betriebsdauer von 79 Jahren summiert sich der Energieverbrauch auf 1.038 MWh, demnach 37 % der Energiemenge, die die DLI benötigte. Die Energiekosten jedoch lägen mit geschätzten 20 ct/kWh bereits bei rund

208.000 EUR. Mit einem Gaspreis von 50 EUR je MWh ergeben sich 141.500 EUR Energiekosten im Verlauf von annähernd 54 Betriebsmonaten während der DLI. Die Kosten für die Behandlung des stark trübstoffhaltigen Abwassers sind hier noch nicht enthalten.

Aussagen über das Austragsverhalten einer Bodenluftabsaugung lassen sich anhand der Ergebnisse der DLI nur erschwert treffen. Sehr hoch waren die anfänglichen Gehalte während der Pilotanwendung und die weitere Entwicklung über mehrere Monate wurde nicht betrachtet.

Alternative thermische Verfahren mit z. B. festen Wärmequellen sind für den schlecht durchlässigen Boden grundsätzlich geeigneter als die DLI. In Folge der Trocknung des Bodens kommt es in den meisten Fällen jedoch zu deutlichen Setzungen. Im denkmalgeschützten Baubestand kann das Verfahren daher als kostengünstigere Lösung nicht empfohlen werden, da der bautechnische Aufwand zum Erhalt der Gebäude erheblich sein würde.

3.2 ISCO-Sanierung

Mit der durchgeführten DLI-Sanierung erfolgte die Abreinigung der ungesättigten Bodenzone. Im Grundwasser waren auch mit Abschluss der DLI-Sanierung LHKW-Konzentrationen auf einem Niveau wie vor der Sanierung vorhanden. Die während der DLI-Sanierung betriebene Grundwasserhaltungen mit Förderraten um die 100 m³ im Monat haben nicht zu einer signifikanten Abnahme der LHKW-Konzentrationen über die Jahre beigetragen.

Da aufgrund der hohen LHKW-Konzentrationen im Grundwasser eine Rekontamination der gereinigten Bodenzone nicht ausgeschlossen werden konnte bzw. diese über Modellrechnungen realistisch erschien, entschied man sich für eine Grundwassersanierung mittels In-situ chemischer Oxidation (ISCO). Für das Verfahren sprachen auf dem Standort die bereits vorhandene Infrastruktur, die schnelle Umsetzung und die überschaubaren Kosten einer Pilotanwendung (einmalige Zugabe des Oxidationsmittels).

3.2.1 Konzeption und Durchführung

Im Rahmen der ISCO-Sanierung wurde die vorhandene Sanierungsinfrastruktur auf dem Standort genutzt und über sechs ausgewählte Bodenluftabsaugbrunnen das Reagenz in den Untergrund eingegeben. Als Oxidationsmittel wurde Natriumpermanganat ausgewählt, da sich dieses im Vergleich z. B. zu Kaliumpermanganat durch eine deutlich geringere Schwermetallverunreinigung auszeichnet. Zudem ist Natriumpermanganat in 40 %-iger Lösung verfahrenstechnisch einfach einsetzbar.

Im Zeitraum von 10 Tagen wurden etwa 8 m³ der 5 %-igen Natriumpermanganatlösung über die Brunnen in den Aquifer gravimetrisch eingegeben (siehe Abbildung 6). Die Oxidationslösung wurde vor Ort aus der vorgehaltenen 40 %-igen NaMnO₄-Lösung in pharmazeutischer Qualität hergestellt. Die Misch- und Dosieranlage wurde auf einer Auffangwanne nach Wasserhaushaltsgesetz im umhausten Container errichtet. Die Zuleitungen zu den Schluckbrunnen E8, I8, E16, E9 sowie E10 wurden als Doppelmantelschlauch ausgeführt. Die gesamte Anlage wurde online überwacht und war neben der eigensicheren Steuerung mit einem Alarmsystem zur Leckagen- und Störungsmeldung ausgestattet. Alle zwei Tage erfolgte die Sichtkontrolle sowie die etwaige Regulierung der Durchflüsse.

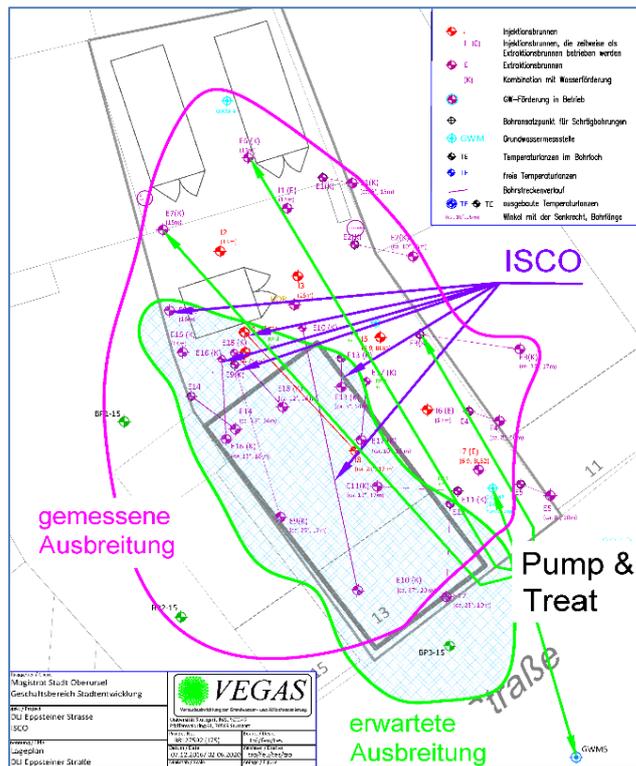


Abb. 6: Lageplan ISCO mit Zugabebrunnen, Grundwasserentnahme sowie projektierte wie bestimmter Permanganatausbreitung

Das entnommene, unterstromig anfallende, permanganathaltige Grundwasser wurde in der bestehenden Anlage der DLI vor Einleitung in die Kanalisation über Wasseraktivkohle reduziert und entfärbt.

3.2.2 Sanierungsverlauf

Die Natriumpermanganatlösung breitete sich rasch im Untergrund aus und es kam zu einer deutlichen Abnahme der LHKW-Konzentrationen im Grundwasser in den Bereichen, die vom Reagenz durchströmt wurden. Die LHKW-Konzentrationen sanken dabei bis in den Bereich der Nachweisgrenze. Die Ausbreitung des Oxidationsmittels wurde im Rahmen des Wasserrechtsantrags entsprechend der vorherrschenden Grundwasserfließrichtung abgeschätzt (grüne Umrandung, Abb. 6). Eine weitreichendere Ausbreitung im Untergrund konnte bestimmt werden (Umrandung magenta, Abb. 6).

Im Gegensatz zur Abnahme der LHKW-Konzentrationen sind die Schwermetallkonzentrationen im Grundwasserleiter gestiegen. Ursache hierfür war eine Mobilisierung von geogen vorhandenen Schwermetallen und an organischer Substanz gebundene Schwermetalle, die durch die Natriumpermanganatlösung aufoxidiert wurde. Während der Monitoringphase sank mit abnehmender Natriumpermanganatkonzentration dann die Schwermetallkonzentration wieder ab.

An einigen Beobachtungspiegeln stiegen die LHKW-Konzentrationen mit dem Verbrauch der Natriumpermanganatlösung wieder an. Dies spricht dafür, dass in diesen Bereichen eine hohe LHKW-Konzentration, insbesondere auch LHKW in Phase vorhanden ist. Es wurde abgeschätzt, dass infolge der Zugabe der Natriumpermanganatlösung bis zu 200 kg an LHKW oxidiert wurde. Die lokal erhöhten Schwermetallkonzentrationen im Grundwasser haben sich abstromig nicht ausgebreitet und sind durch Adsorptionsvorgänge mit dem Verbrauch des Oxidationsmittels wieder zurückgegangen.

3.2.3 Fazit

Mit dem ISCO-Verfahren konnte mit überschaubarem Aufwand sehr zeitnah eine Reduktion der LHKW-Konzentration im Grundwasserleiter herbeigeführt werden. Im vorliegenden Projekt konnte

dabei auf die existierende Sanierungsinfrastruktur mit der engen Anzahl an Bodenluftabsaugpegel, die bis in die gesättigte Zone verfiltert waren bzw. Grundwassermessstellen, zurückgegriffen werden. Die Umsetzung der Grundwassersanierung erfolgte in sehr kurzer Zeit. Die Grenzen des ISCO-Verfahrens im vorliegenden Fall waren durch die Freisetzung von Schwermetallen im Untergrund bedingt.

Grundsätzlich empfehlenswert ist bei ISCO-Sanierungen die Durchführung von Vorversuchen mit Grundwasserproben bzw. Bodenmaterial, um die genaue Menge an einzugebendem Oxidationsmittel zu kalkulieren und entstehende Begleitprozesse abschätzen zu können. Hierauf wurde im vorliegenden Fall aufgrund der guten Datenlage verzichtet.

4 Sanierung im innerörtlichen Bereich

4.1 Standortüberwachung

Im Vergleich zu Altlastensanierungen in Industrie- und Gewerbegebieten erfordert eine Sanierung im innerörtlichen Bereich mit seiner dichten Bebauung und Wohnnutzung eine engere Überwachung. Ein wichtiger Punkt dabei ist neben der Überwachung von relevanten Eingriffs- bzw. Grenzwerten die Schaffung von Vertrauen. Entsprechend geht es aus gutachterlicher Sicht auch immer darum einen Kompromiss, zwischen dem aus gutachterlicher Sicht notwendigem Monitoring und den Wünschen der betroffenen Anwohner bzw. der Öffentlichkeit, zu finden.

Über den gesamten Sanierungsverlauf erfolgte mittels Passivsammler ein kontinuierliches Raumluftmonitoring. Die Ergebnisse zeigten Tendenzen bei der Entwicklung der Raumluftkonzentrationen an. Bei Messauffälligkeiten wurden zeitnah aktive Raumluftmessungen veranlasst um aufzuzeigen, ob die Nutzenden dauerhaft einer hohen LHKW-Belastung ausgesetzt waren und es wurden Maßnahmen eingeleitet, um Belastungen zu reduzieren. Dazu zählten u. a. Lüftungsempfehlungen/-pläne, der Einsatz von Raumluftreinigungsgeräten oder die Installation von Zwangsbelüftungen in Räumen, in denen über längere Zeiträume Auffälligkeiten zu beobachten waren.

Zusätzlich wurden im Rahmen des umfassenden Monitoringkonzeptes über Bodenluftpegel die Konzentrationsentwicklungen im Untergrund überwacht. Dies wurde kombiniert mit Unterdruckmessungen während der Phase der DLI-Sanierung, um aufzuzeigen, dass die Sanierungsfläche pneumatisch gesichert ist und kein Schadstoff verschleppt wird.

In einigen Bereichen wurden mit sogenannten Bodenluftboxen die direkten Transferraten von LHKW aus dem Boden in die Atmosphäre gemessen, um hier die tatsächlich auftretenden Konzentrationen zu erfassen und bewerten zu können.

In größeren Abständen erfolgten Außenluftmessungen, um die Außenluftbelastungen durch Freisetzung von LHKW aus der Anlage beurteilen zu können. Diese Messungen zeigten auf, dass auf der Sanierungsfläche geringfügig höhere LHKW-Konzentrationen auftraten, die sich schon wenige Meter vom Standort entfernt wieder auf einem sehr niedrigen Niveau bewegten.

4.2 Öffentlichkeitsarbeit

Ein wichtiger Baustein des Projektes war eine kontinuierliche und proaktive Öffentlichkeitsarbeit, um Bedenken und Ängste bei der Sanierung zu nehmen. Bausteine hierzu waren eine enge, regelmäßige Kommunikation mit den Anwohnenden. Diese hatten jederzeit die Möglichkeit, sich bei der Projektsteuerung zu melden, Fragen zu stellen und weitere Informationen anzufordern. Auch wurden auf Wunsch der betroffenen Anwohnenden Messprogramme ausgeweitet (Raumluftmessungen in weiteren Räumen), wenn es sich aus gutachterlicher Sicht als sinnvoll erwiesen hat. Die Anwohnenden wurden

bei Vorlage der Raumluftmessergebnisse immer persönlich zur Situation in ihren Gebäuden informiert und einmal im Quartal erfolgte ein Quartalsbericht zum Stand der Sanierung. Dieser wurde auch auf der projekteigenen Homepage im Internet veröffentlicht. Auf dieser Seite wurde kontinuierlich zum Fortgang der Sanierung informiert und es finden sich auf der Seite alle erstellten Berichte und Gutachten in Zusammenhang mit der Sanierung. Darüber hinaus erfolgte eine proaktive Öffentlichkeitsarbeit, mit der Veröffentlichung von Informationen zu Sanierungsfortschritten und -entwicklung über Pressemitteilungen. Regelmäßig wurde in den politischen Entscheidungsgremien der Stadt über das Projekt berichtet.

Mit den Kritikern des Sanierungsverfahrens fanden in losen Abständen Treffen statt, wenn diese nach Umweltinformationsgesetz Akteneinsicht nahmen. Im Zuge der Termine wurden dann sich ergebende Fragen direkt erörtert und beantwortet.

5 Erkenntnisse und Empfehlungen für zukünftige Vorhaben

5.1 Projektsteuerung

Die Projektsteuerung von Sanierungen im innerörtlichen Bereich erfordert ein hohes Maß an Kommunikation. Die Kommunikation gegenüber der Öffentlichkeit ist mit einem nicht zu unterschätzenden Aufwand verbunden, der auch monetär darzustellen ist.

Grundlage einer glaubwürdigen Projektsteuerung ist ein hohes Maß an Transparenz über die erforderlichen Schritte einer innerörtlichen Sanierung. Hierbei ist es auch immer wieder wichtig im Vorfeld abzuschätzen, wie bestimmte Maßnahmen einer Sanierung von der Öffentlichkeit aufgenommen und diskutiert werden. Wichtig ist dabei, alle Entscheidungen genau und nachvollziehbar zu begründen. Im vorliegenden Projekt haben sich hier ausführliche Baubesprechungsprotokolle bewährt, die auch den Weg hin zu einer getroffenen Entscheidung und die zugrundeliegenden Überlegungen, Alternativen und Diskussionen beinhalteten.

Für die Information der Öffentlichkeit hat sich ein kurzes knappes Format in Form von sogenannten Quartalsberichten bewährt, die die Anwohnenden direkt erhielten und auf der Homepage veröffentlicht wurden. Darüber hinaus ist eine proaktive Pressearbeit empfehlenswert, die es der Presse ermöglicht, über ein Vorhaben fachlich fundiert, aber auch verständlich zu berichten. Hier ist es für Gutachter bzw. Fachleute wichtig, die teilweise komplexen naturwissenschaftlichen Vorgänge, in allgemein verständlicher Form / Sprache darzustellen.

Wichtig ist in Zusammenhang mit dem Thema Anwohnerschutz ein durchdachtes Messprogramm. Ziel muss es dabei sein, den Anwohnenden aufzuzeigen, dass die Sanierung umfassend überwacht wird und so keinerlei Bedenken bei den Betroffenen in Fragen einer Gefährdung aufkommen. Dies betrifft auch eine messtechnische Überwachung während der Einrichtung der Sanierungsanlage.

5.2 In-situ-Sanierungen

In-situ-Sanierungen sind für den innerörtlichen Bereich interessant, da in der Regel die Nutzung von Gebäuden und Grundstücken weiterlaufen kann, während im Untergrund Bodenluft oder Grundwasser saniert werden.

Ein Thema bei innerörtlichen In-situ-Sanierungen ist im eng bebauten Bereich die Frage des Lärmschutzes – insbesondere, wenn Absaugeinrichtungen und Anlagen 24 h betrieben werden. Meist sind entsprechende Lärminderungsmaßnahmen und Schallschutzmaßnahmen erforderlich.

Bei innerörtlichen Standorten ist die Frage der Abluftableitung aus Bodenluftsanierungsanlagen eine wichtige Frage, da die Abluft nicht in einen Hinterhof einströmen sollte. Daher sind entsprechend hohe Abluftkamine zu berücksichtigen, so dass die Abluft sich gut in der Atmosphäre verteilen kann.

Wartungsarbeiten oder sonstige Tätigkeiten an einer Anlage erfordern Abstimmungen und Informationen mit den Anwohnenden. Gegebenenfalls müssen die Zugänglichkeiten zur Sanierungsfläche und Anlage geklärt und im Vorfeld entsprechende Absprachen getroffen werden. Angeraten ist auch eine messtechnische Überwachung solcher Arbeiten.

Der visuelle Eindruck einer Sanierungsanlage ist für deren Akzeptanz in der Öffentlichkeit ebenfalls von Bedeutung. Im Projektbeispiel Oberursel waren für den zu Beginn stattfindenden Pilotbetrieb die Absaugeinrichtungen (Absaugleitungen, Rohrleitungen, Kabel) offen verlegt. Eine Installation unterflur hat bei der Durchführung der Hauptsanierung zu einer größeren Akzeptanz für die Anlage bzw. für die Sanierung beigetragen.

Während der Sanierung – im vorliegenden Beispiel der DLI-Sanierung - ist zu klären inwieweit auch andere Maßnahmen zu gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnissen beitragen bzw. zusätzlich beitragen können. Im vorliegenden Fall waren Raumluftreinigungsgeräte im Einsatz bzw. wurden bei zwei Gebäuden Zwangsbelüftungen installiert, die für einen lüftungsunabhängigen Austausch der Raumluft sorgten.

Die Anwendung und der Einsatz der DLI am Standort konnte mit einigem technischen und baulichem Einsatz bestätigt werden. Eine vorgeschaltete Pilotanwendung zur Verifizierung der Einsatzmöglichkeiten und auch deren Grenzen wird bei kritischen Fällen empfohlen. Alternative Sanierungstechniken waren am Standort aufgrund des Baubestands und den hydraulischen Bedingungen problematisch. Die erfolgreiche Anwendung der DLI war sowohl technisch als auch monetär mit hohem Einsatz verbunden, was durch die hohe Massentransportleistung als angemessen erscheint. Insbesondere, wenn der Aufwand für Monitoring, Öffentlichkeitsarbeit, Analysen und Betreuung deutlich über den Kosten für Energie oder für die Sanierungsanlage liegt.

Die wesentliche Erkenntnis hinsichtlich der Planung und Kostenermittlung thermisch unterstützter Verfahren war die Erfordernis den Schadstoffaustrag basierend auf dem Gehalt an organischem Material auf dem Bodenkörper in die Berechnungen einzubeziehen.

Literatur

- [1] Koschitzky, H.-P., Trötschler, O., Limburg, B., Hirsch, M., Weiß, H., (2008). Steam-air injection for in-situ groundwater and soil remediation: pilot application at the former industrial site in Zeitz, Germany. In: F&U Confirm Publisher, Leipzig, Germany: Proceedings of ConSoil 2008, LeS E.4, Mailand, 03. – 06.06.2008, ISBN 978-3-00-024598-5
- [2] Awandu, W. (2018). Determination of mass transfer rates of Contaminants during Steam-Air Enhanced in-situ remediation process, Master Thesis, course WAREM, VEGAS, Universität Stuttgart.
- [3] Hülpiusch, D., Schrenk, V. & Trötschler, O. (2017). Kleiner Standort – große Herausforderung: Sanierung einer Boden- und Grundwasserverunreinigung unter besonderen Rahmenbedingungen mit Dampf-Luft-Injektion. S. 67 - 75. In: Altlasten annual 2016, Wiesbaden 2017, ISBN 978-3-89531-875-7.
- [4] Schrenk, V, Herklotz, K., Trötschler, O., Gessner, J. & Strobehn, B. (2018). Thermische In-situ-Sanierung im innerörtlichen Bereich – Herausforderungen der Projektsteuerung. S. 61 – 66. In: 20. Symposium Strategien zur Sanierung von Boden & Grundwasser 2018, Frankfurt am Main